

Mobility Support Scheme Based on Machine Learning in Industrial Wireless Sensor Network

Sangdae Kim[†] · Cheonyong Kim^{††} · Hyunchoong Cho^{†††} · Kwansoo Jung^{††††} · Seungmin Oh^{†††††}

ABSTRACT

Industrial Wireless Sensor Networks (IWSNs) is exploited to achieve various objectives such as improving productivity and reducing cost in the diversity of industrial application, and it has requirements such as low-delay and high reliability packet transmission. To accomplish the requirement, the network manager performs graph construction and resource allocation about network topology, and determines the transmission cycle and path of each node in advance. However, this network management scheme cannot treat mobile devices that cause continuous topology changes because graph reconstruction and resource reallocation should be performed as network topology changes. That is, despite the growing need of mobile devices in many industries, existing scheme cannot adequately respond to path failure caused by movement of mobile device and packet loss in the process of path recovery. To solve this problem, a network management scheme is required to prevent packet loss caused by mobile devices. Thus, we analyse the location and movement cycle of mobile devices over time using machine learning for predicting the mobility pattern. In the proposed scheme, the network manager could prevent the problems caused by mobile devices through performing graph construction and resource allocation for the predicted network topology based on the movement pattern. Performance evaluation results show a prediction rate of about 86% compared with actual movement pattern, and a higher packet delivery ratio and a lower resource share compared to existing scheme.

Keywords : Wireless Sensor Networks (IWSNs), Linear Regression Algorithm, Mobility Support, Graph Construction, Resource Allocation

산업용 무선 센서 네트워크에서의 기계학습 기반 이동성 지원 방안

김 상 대[†] · 김 천 용^{††} · 조 현 중^{†††} · 정 관 수^{††††} · 오 승 민^{†††††}

요 약

산업용 무선 센서 네트워크는 여러 산업 분야에서의 생산성 향상, 비용 절감 등을 위해 사용되고 있으며, 저지연, 고신뢰 데이터 전송과 같은 성능을 요구한다. 이를 달성하기 위해서, 산업용 무선 센서 네트워크에서는 네트워크 매니저를 통해 네트워크 위상에 대한 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하여, 각 장치의 전송 주기 및 경로를 미리 결정한다. 하지만, 이러한 네트워크 관리 방법은 네트워크 위상 변화 시에 그래프 재생성 및 자원 재할당을 수행해야 하므로, 잦은 위상 변화가 발생하는 네트워크 환경에서는 관리비용 증가와 요구성능의 일시적 저하와 같은 현상이 발생하므로 적합하지 않다. 즉, 최근에 다양한 이동 장치를 활용하는 산업용 무선 센서 네트워크에서는 이동 장치로 인한 경로 단절 및 경로 재구성 과정에서 발생하는 지연 전송과 전송 신뢰성 저하를 방지할 수 있는 네트워크 관리 방안에 관한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 기계학습을 이용하여 이동 장치의 시간별 위치 및 이동 주기를 분석하고, 이에 기반한 이동 패턴을 추출한다. 또한, 추출된 이동 패턴 정보를 기반으로 예측되는 시간별 네트워크 위상에 대한 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하는 네트워크 관리 기능을 제안함으로써, 이동 장치의 이동으로 인한 성능 저하의 문제를 방지한다. 성능평가 결과는 제안 방안이 추출한 이동 패턴과 실제 이동 패턴을 비교하였을 때 약 86%의 예측 정확도를 보이고, 기존의 방법에 비해 높은 전송 성공률 및 낮은 자원 점유율의 성능을 보여준다.

키워드 : 산업용 무선 센서 네트워크, 선형회귀 알고리즘, 이동성 지원, 그래프 계산, 자원 할당

* 이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2020R111A1A01070561).

† 정 회 원 : 공주대학교 산학협력단 박사후연구원

†† 비 회 원 : 한국과학기술정보연구원 박사후연구원

††† 비 회 원 : 충북대학교 정보통신공학부 박사후연구원

†††† 정 회 원 : 대전대학교 핀테크학과 조교수

††††† 비 회 원 : 공주대학교 컴퓨터공학부 조교수

Manuscript Received : September 16, 2020

Accepted : October 22, 2020

* Corresponding Author : Seungmin Oh(smoh@kongju.ac.kr)

1. 서 론

WirelessHART[1]로 대표되는 산업용 무선 센서 네트워크는 산업 인터넷의 한 종류로, 제조, 채광, 농경 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[2]. 이 네트워크는 각 분야에서 활용되는 다양한 장치, 환경 등에 대한 정보를 수집하고 이에 기반한 의사결정을 수행함으로써, 전술된 각각의 산업 분야

에서의 이윤 증대, 효율성 및 생산성 향상, 비용 감소 등을 목표로 하고 있다[3, 4]. 예를 들어, 모니터링 시스템[5]의 경우, 현재 가동 중인 장비의 상태를 지속해서 감시함으로써 장비의 파손 및 고장 등을 사전에 예측하여 장비의 오류로 인한 품질 저하 또는 생산성 하락을 방지하고, 재고관리 시스템[6]의 경우, 원재료 및 제품 적재량 등을 시기적절하게 파악함으로써, 원활한 원재료 공급 및 제품의 과적 상태를 방지할 수 있다. 또한, 제어 시스템의 경우, 주변 센서로부터 발생한 데이터를 통해 공정을 자동화함으로써 비용 절감을 이끌어낼 수 있다.

산업용 무선 센서 네트워크가 앞서와 같이 다양한 분야에서 활용되기 위해서는 적절한 데이터 수집, 즉 저지연 및 고신뢰 데이터 전송을 요구한다[7]. 하지만, 과거 유선[8, 9]과 달리 무선은 전송 간 충돌 및 간섭에 취약하므로[10], 산업용 무선 센서 네트워크에서는 네트워크 관리자를 통한 경로 생성 및 자원 할당을 수행한다. 즉, 네트워크 매니저는 먼저 네트워크를 구성하는 각 장치에 대한 정보를 수집하여 네트워크 전체 위상에 대해 유한 경로 그래프를 생성한다. 이 후, 생성된 그래프를 기반으로 Time Slotted Channel Hopping (TSCH)을 활용하여 각 장치가 어떤 시간에, 어떤 채널을 통해 어떤 장치에게 데이터 및 명령을 전송할 것인지를 미리 결정(이를 자원 할당이라 표현한다)하고 이를 각 장치에 알림으로써 데이터 전송 간 충돌 및 간섭 문제를 해결할 수 있다[11].

하지만, 산업용 무선 센서 네트워크는 과거 유선 시스템이 가지는 설치의 어려움, 배선 및 설비 보호 등 유선의 단점을 완화하는 데 초점을 맞추어 설계되었기 때문에, 작업자 및 이동 장치의 이동으로 인한 위상변화에 적절히 대응할 수 없다 [12, 13]. 예를 들어, FASyS 프로젝트와 같이 작업자의 안전 보장을 위해 작업자의 정보를 수집하는 경우, 작업자의 이동에 따라 네트워크 위상변화가 발생하게 된다. 즉, 기존의 방법에서는 위상변화에 대처하기 위해 앞서 설명된 그래프 생성 및 자원 할당을 반드시 재수행해야 하며, 이 과정이 진행되는 동안 이동 장치와 네트워크의 통신은 단절된다. 또한, 이동 장치를 거쳐 데이터를 전달하는 장치 역시 악영향을 받으므로, 네트워크 전체적인 성능이 저하되고 이는 곧 다양한 산업용 어플리케이션에서 치명적인 문제를 일으킨다.

따라서 본 논문에서는 기계학습을 통해 이동 장치의 이동을 예측하고, 이에 따른 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하는 방법을 제안한다. 먼저, 이동 장치의 이동 정보를 수집하기 위해, Kim *et al.*[14]의 방법에 따라 모든 장치에 이동 장치와의 통신을 위한 그래프 생성 및 자원 할당을 수행한다. 이를 통해, 이동 장치는 자신에게 인접한 장치를 통해 네트워크 매니저에게 데이터를 전달하고, 네트워크 매니저는 이동 장치가 어느 시점에 어떤 장치를 통해 데이터를 전달하였는지에 대한 정보를 수집한다. 수집된 정보에 기반하여, 네트워크 매니저는 지도 학습[15] 방법 중 하나인 선형회귀 알고리즘[16]을 통해 이동 장치의 이동 패턴을 예측해내고, 이에 기반하여 예측되는 시간별 네트워크 위상에 대한 그래프 생성 및 자원 할당을 수행한다.

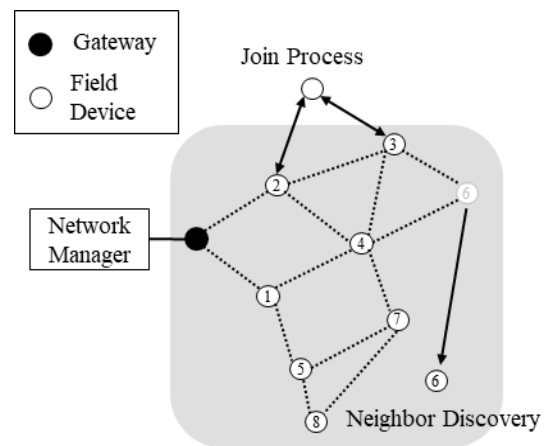
본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 현재 WirelessHART로 대표되는 산업용 무선 센서 네트워크의 동작 과정과 장치의 이동으로 인해 발생하는 문제에 대해 정의한다. 3장에서는 정의된 문제를 해결하기 위한 기계학습 기반 이동성 지원 방안을 단계별로 설명하며, 이에 대한 성능평가를 4장에서 기술한다. 마지막으로 5장에서는 향후 연구와 함께 본 논문을 결론짓는다.

2. 관련 연구 및 문제 정의

본 장에서는 산업용 무선 센서 네트워크의 대표적인 예시인 WirelessHART의 개요 및 기본적인 동작 과정에 대해 설명하고, 이동 장치의 이동으로 인해 발생하는 문제에 대해 정의한다.

2.1 WirelessHART 개요 및 동작 과정

본 절에서는 WirelessHART의 전체적인 개요 및 동작 과정에 대해 설명한다. Fig. 1은 WirelessHART 네트워크와 그에 대한 자원 할당 예시를 보여준다.



(1 TS = 10ms)

CH. \ TS	0	1	2	3	...
0	8→7	7→4	4→2	2→GW	
1		8→5	5→1		
2	6→4	6→3		3→4	
...					

Fig. 1. An Example of WirelessHART Network and Resource Allocation

네트워크는 크게 Field Device, Gateway, Network Manager로 구성된다. Field Device는 실제 배치된 센서를 의미하며, 장치나 환경 등으로부터 데이터를 수집하여 Gateway로 데이터를 전달한다. Gateway는 WirelessHART 네트워크와 외부 백본 네트워크를 연결하는 중심점으로, 각 Field Device로부터 수집되는 데이터의 중착점이다. Network Manager는 산

업 환경에서 요구하는 저지연, 고신뢰 데이터 전송을 위해 네트워크를 구성 및 관리한다. 즉, Gateway를 통해 수집된 장치 정보들을 기반으로, 네트워크 위상에 대한 유향 그래프를 생성 및 자원 할당을 수행한다. 특히, 자원 할당 과정에서 TSCH를 활용함으로써 각 장치의 데이터 전송 과정에서 발생할 수 있는 전송 충돌 및 간섭을 배제한다. 또한, 장치의 추가, 제거와 같은 네트워크 변화가 발생하는 경우에도 이를 반영하여 전송 경로 및 시간을 조율한다. Network Manager는 WirelessHART 네트워크의 중심적인 기능을 수행하며, 특히 네트워크의 변화에 대응하는 것에 주 목적이 있다. 대표적으로 새로 추가된 장치를 네트워크에 참여시키기 위한 Join Process와 장치의 위치 변경, 환경의 변화 등으로 인한 위상 변화를 다루기 위한 Neighbor Discovery Process가 있다.

Join Process를 수행하기 위해서, 이미 네트워크에 참여한 Field Device들은 주기적인 광고 메시지를 전송하게 되고, 광고 메시지에 새로운 Field Device가 네트워크와 임시적으로 통신할 수 있는 제어 자원에 대한 정보가 기록되어 있다. 이를 수신한 새로운 Field Device는 제어 자원을 통해 Network Manager에게 자신의 네트워크 참여 의사를 전달한다. 이를 수신한 Network Manager는 새로운 Field Device가 참여하여 변경된 네트워크 위상에 대해 그래프 재생성 및 자원 할당을 수행하고 이를 네트워크에 전달한다. 이 과정을 통해 새로운 Field Device는 네트워크의 구성원으로 포함되며 Network Manager에 의해 지정된 자원을 이용하여 자신이 탐지한 데이터를 주기적으로 보고하게 된다.

Neighbor Discovery Process는 이미 Join Process를 통해 네트워크에 참여한 장치의 위치를 바꾸거나, 차단막 설치와 같은 환경 변화로 인한 장치 간 통신 품질이 변화되었을 때를 다루기 위해 사용된다. 이 과정을 위해 이미 네트워크에 참여한 Field Device들은 Network Manager에 의해 결정된 주기별로 Discovery 메시지를 전송하며, 이는 Keep-alive 메시지와 유사한 기능을 하는 동시에 새로운 경로 여부를 탐색한다. 즉, 네트워크 위상의 변화가 없는 경우에 Discovery 메시지는 자신 근처의 이웃이 정상적으로 동작하는지 주기적으로 확인하는 용도로 사용된다. 하지만, 네트워크의 변화가 발생하는 경우, 임의의 Field Device들은 네트워크 변화에 따라 새로운 Field Device로부터 Discovery 메시지를 수신하거나, 또는 기존 자신의 이웃 Field Device로부터 Discovery 메시지 수신에 실패한다. 이 경우, 각각의 Field Device는 탐지된 변화를 Network Manager에게 보고하고, Network Manager는 변화된 네트워크 위상에 따라 그래프 재생성 및 자원 재할당을 수행하여, 각 Field Device에게 통신을 위한 경로 및 시간을 알려준다.

2.2 이동 장치의 이동으로 인한 문제점 정의

앞서 2.1절에서 설명하였듯이, WirelessHART는 네트워크의 변화에 대응하기 위해 Neighbor Discovery를 활용한다. 하지만, 이 방법은 초기 Network Manager에 의해 결정

된 주기마다 Discovery 메시지를 전송하기 때문에, 네트워크의 변화에 빠르게 대처하기 어렵다. 즉, 기존의 Discovery 방법은 장치의 이동과 같은 연속적인 변화에 대응하기 어렵다.

Fig. 1에서 장치 6이 이동 장치이며, 최초 Join Process를 통해 네트워크에 연결되었다고 가정하자. 네트워크 매니저는 장치 6의 통신을 위해 그래프를 생성하고, 자원 할당을 수행하게 된다. 이 때, 장치 6이 장치 7, 장치 8에 가깝게 이동하게 되어 장치 3, 장치 4와의 연결이 끊어지게 되더라도, 네트워크 매니저가 Neighbor Discovery를 통해 네트워크의 위상이 변화되었음을 인지하기 전까지 이 단절을 복구할 수 없다. 즉, 해당 변화가 반영될 때까지, 장치 6은 정해진 시간 및 채널을 통해 장치 3, 장치 4를 통해 Gateway로의 데이터 전달을 시도하게 되며, 해당 데이터는 모두 누락된다. 이러한 문제는 비단 이동 장치만의 문제가 아니라, 이동 장치를 부모로 가진 자손 노드들이 존재하는 경우, 해당 노드들에게 까지 악영향이 전해진다. 또한, 장치가 계속해서 이동하는 경우, 네트워크 매니저가 Neighbor Discovery를 통해 새로운 그래프 생성 및 자원 재할당을 수행하더라도, 발견 시점의 위치와 실제 위치가 다르므로 앞서 과정을 반복하게 되며, 이동 장치와의 통신이 불안정하게 된다.

3. 기계 학습 기반 이동성 지원 방안

본 장에서는 앞서 2장에서 설명된 WirelessHART로 대표되는 기존 산업용 무선 센서 네트워크에서 이동 장치로 인한 통신 단절 문제를 해결하기 위한 방안을 제안한다. 제안 방안은 선형회귀 알고리즘을 통한 이동 장치와 고정 장치 간의 통신주기 파악 및 이에 기반한 시간별 네트워크 위상에 따른 그래프 생성 및 자원 할당의 세 단계로 구성된다.

3.1 선형회귀 알고리즘 기반 이동 패턴 추출

먼저, [14]의 방법에 따른 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하여, 이동 장치의 시간별 위치를 획득하고 이를 기계학습의 훈련 집합으로 사용한다. 훈련 집합은 입력 X와 출력 Y로 표현되며 아래의 집합은 본 논문에서 활용한 훈련 집합의 일부이다.

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ \vdots \\ 100 \\ 110 \\ \vdots \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ \vdots \\ 3 \\ 2 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

각 장치는 정해진 역할에 따라 주기적으로 데이터를 전송하고, 이는 역할에 따라 주기적으로 반복된다. 위의 훈련 집합에서 입력 X는 이동 장치가 이웃 고정 장치를 통해 데이터를 전송한 시점이며, 출력 Y는 이동 장치의 데이터를 수신한 이웃 고정 장치에 대한 라벨(장치식별번호)이다.

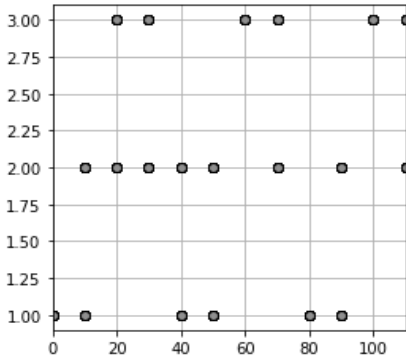


Fig. 2. Schematized Training Data Sets

Fig. 2는 입력 X와 출력 Y에 대한 데이터를 도식화한 것으로 이를 가우스 기저 함수에 기반한 선형회귀 분석을 통해 학습시킨다. n개의 가우스 기저 함수가 적용된 함수는 다음과 같이 표기된다.

$$y(x, \mathbf{w}) = w_0\phi_0(x) + w_1\phi_1(x) + w_2\phi_2(x) + \dots + w_n$$

매개변수 w는 가중치 매개 변수이며, 기저 함수의 상하 평행이동을 조절하는 역할을 수행한다. 위의 수식 $y(x, \mathbf{w})$ 는 입력 x를 예측한 결과 y를 반환하게 된다. 이때 \mathbf{w} 는 예측 함수의 오차를 나타내는 평균 제곱 오차 $J(\mathbf{w})$ 를 최소화하는 값으로 계산된다. 평균 제곱 오차 J 는 다음과 같이 결정된다.

$$J(\mathbf{w}) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{ \mathbf{w}^T \phi(x_n - t_n) \}^2$$

위 수식을 기반으로 최적의 평균 제곱 오차 $J(\mathbf{w})$ 를 가지는 최적의 매개변수 \mathbf{w} 를 산출하고 난 뒤, 예측 함수의 과소, 과대 적합을 피하여 일반화하기 위한 기저 함수의 수 M을 결정해야 한다. 이를 결정하기 위해 기저 함수의 수를 늘려가며 K겹 교차 검증 방법을 이용한다. K겹 교차 검증은 훈련 집합을 K개로 분할하고 이 중 하나를 테스트 집합으로 나머지를 훈련 집합으로 사용한다. 훈련 집합을 사용해 모델의 매개변수를 최적화하고, 테스트 집합의 평균 제곱 오차를 계산한다. Fig. 3은 K겹 교차 검증 방법을 도식화한 것이다.

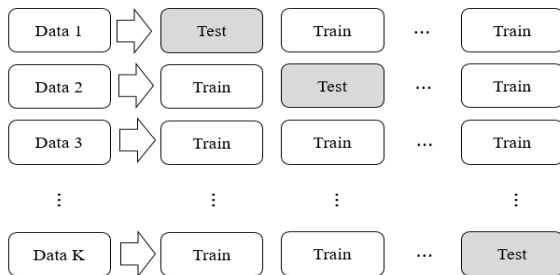


Fig. 3. K-fold Cross Validation

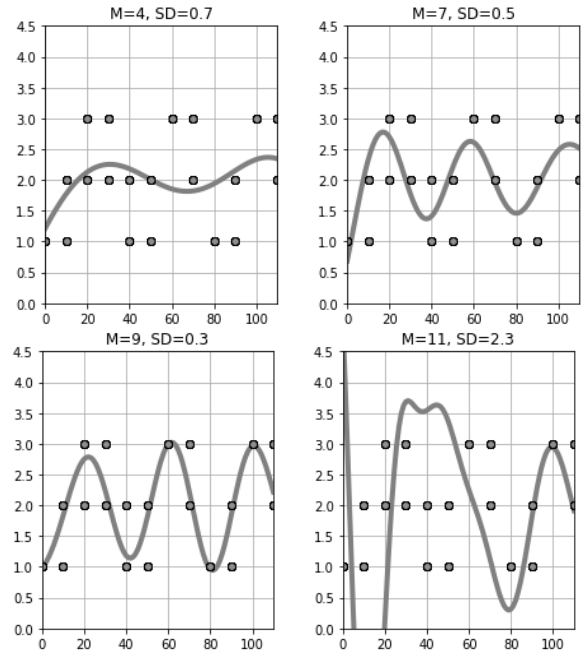


Fig. 4. Fitting Results According to Number M of Basis function

Fig. 4는 앞서 K겹 교차 검증을 수행하여 선형 기저 함수의 수 M이 각각 4, 7, 9, 11일 때의 피팅결과 그래프이다. 기저 함수의 수가 증가함에 따라 함수의 차수가 증가하게 되어 훈련 집합에 더욱 근사해짐을 확인할 수 있으며, 이에 따라 훈련 데이터와 테스트 데이터의 오차(SD)가 점차 감소함을 확인할 수 있다. 하지만, 기저 함수의 수가 너무 커질 경우 오히려 오차가 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 주어진 훈련 집합에 기반한 휴리스틱 방법으로, 기저 함수의 수가 9일 때 가장 적은 오차(0.3)를 보이는 훈련 결과가 가장 높은 예측 정확도를 나타내는 것으로 판단한다. 결과적으로 해당 모델을 통해 얻은 기저 함수의 수를 입력에 대해 가장 유력한 예측 모델로 결정한다. 해당 모델을 통해 이동 장치의 시간(주기)별 위치를 나타내면 다음과 같다.

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ 10 \\ 20 \\ 30 \\ 40 \\ 50 \\ 60 \\ 70 \\ 80 \\ 90 \\ 100 \\ 110 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 0.97(1) \\ 1.86(2) \\ 2.72(3) \\ 2.25(2) \\ 1.18(1) \\ 1.77(2) \\ 3.02(3) \\ 2.19(2) \\ 0.95(1) \\ 1.86(2) \\ 2.98(3) \\ 2.22(2) \end{bmatrix}$$

X는 이동 장치의 이동 주기를 의미하며 본 논문에서 활용한 훈련 집합에서 장치는 120초 주기로 움직이며, 장치 1, 2, 3을 순회한다. 그리고 Y는 시간별 접속 장치의 라벨을 의미

하며 시간별 이동 장치와의 통신이 가능할 것으로 예측되는 장치의 라벨이다. 예를 들어, 주기 0일 때 이동 장치는 장치 1 또는 장치 2를 통해 데이터를 전송하였고, 훈련 집합을 통해 훈련한 결과 0.97로 장치 1을 통해 데이터를 보내는 경우가 많은 것을 의미한다. 마찬가지로, 주기 10일 때 이동 장치는 장치 2 또는 장치 3을 통해 데이터를 전송하였고, 훈련 결과 1.86으로 장치 2를 통해 데이터를 보내는 경우가 많았다는 것을 알 수 있다. 통신을 수행하기 위한 장치를 확정하기 위해 우리는 훈련 결과를 반올림하여 장치를 특정하였다. 그 결과, 실제 이동 장치의 이동과 예측 모델을 비교하였을 때 약 86%의 정확도를 보였으며, 이는 이동 장치의 실제 이동을 비교적 높은 수준으로 예측했다고 볼 수 있다.

3.2 이동 패턴 기반 그래프 생성 및 자원 할당

본 절에서는 앞서 3.1절에서 예측한 이동 장치의 이동 패턴에 기반하여, 이동 장치의 시간별 그래프를 생성하고 해당 그래프에 따라 자원을 할당하는 방법에 대해 설명한다. 단, 본 논문의 핵심 아이디어는 이동 장치의 이동 패턴 및 주기에 따라 별개의 그래프를 생성하고 각각의 자원을 할당하는 데 있기 때문에, 산업용 무선 센서 네트워크에서 대표적인 그래프 생성 및 자원 할당 방법 중 하나인 Han *et al.*[17]의 방법에 제안 방안이 적용되었을 때 생성되는 그래프 및 자원 할당 결과에 초점을 맞추어 설명한다.

Fig. 5는 기본적인 네트워크 토폴로지와 Han *et al.*의 방법에 제안 방안이 적용되었을 때, 각 주기별 네트워크 위상과 그에 따른 Uplink 그래프의 예시를 보여준다. 먼저, Fig. 5에서 장치 6이 이동 장치이며, Fig. 5(a)와 같이 장치 1, 장치 2, 그리고 장치 3 근처를 순회한다고 가정하자. 이 때, Fig. 5(b)는 장치 1과 통신을 수행하기 위한 그래프, Fig. 5(c)는 장치 2와 통신을 수행하기 위한 그래프, 그리고 Fig. 5(d)는 장치 3과 통신을 수행하기 위한 그래프를 각각 나타낸다. 최초 이동 장치 6은 Fig. 5(a)와 같이 장치 3, 4의 인근에서 Join Process를 통해 네트워크에 가입하였고, 일정 주기에 따라 검은 실선을 따라 왕복하게 된다. 앞서 3.1절에서 학습한 결과에 따라, 네트워크 매니저는 이동 장치가 통신을 위해 이용하는 장치가 장치 1, 장치 2, 그리고 장치 3인 것을 알고 있으며, 각 장치에 언제 연결되는지 알고 있다. 따라서 TS 0, TS 40, 그리고 TS 80의 시점에 장치 1과의 통신에 활용될 그래프(Fig. 5(a))를 생성한다. 마찬가지로 TS 10, TS 30, TS 50, TS 70, TS 90, 그리고 TS 110의 시점에 장치 2와 통신에 활용될 그래프(Fig. 5(c))를 생성하고, TS 20, TS 60, 그리고 TS 100의 시점에 장치 3과 통신에 활용될 그래프 (Fig. 5(d))를 생성한다. Fig. 5의 모든 그래프는 Han *et al.*의 방법을 통해 생성할 수 있지만, 임의의 시간에 어떤 그래프를 그려야 하는지 알기 어렵다. 하지만, 제안 방안은 이동 패턴에 기반하여 시간별 접속 장치에 따른 그래프를 생성, 활용함으로써 이동 장치의 이동으로 인한 경로 단절 및 이를 복구하기 위한 그래프 재계산 및 자원 재 할당을 수행하지 않을 수 있다.

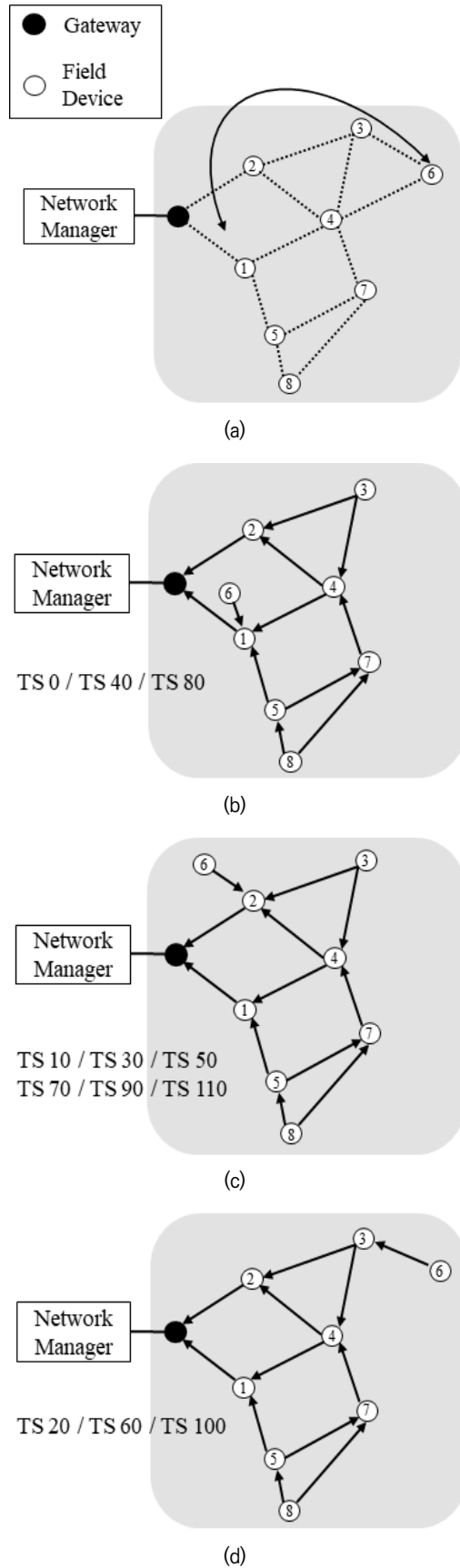


Fig. 5. Examples of Routing Graph based on Mobility Pattern

	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	...	TS10	TS11	TS12	...	TS20	TS21	TS22
CH. 1	8→7	6→3	6→4	4→2	3→4		8→7	6→3	6→4		8→7	6→3	6→4
CH. 2		8→5	3→2	5→7	2→G			8→5	3→2			8→5	3→2
CH. 3			5→1						5→1				5→1
...													

Fig. 6. An Example of Resource Allocation Generated by Existing Scheme [17]

	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	...	TS10	TS11	TS12	...	TS20	TS21	TS22
CH. 1	6→8	6→3	6→7	6→4	6→2		6→8	6→3	6→7		6→8	6→3	6→7
CH. 2		8→7	8→5	5→7	7→4			8→7	8→5			8→7	8→5
CH. 3			3→4	3→2	5→1				3→4				3→4
...													

Fig. 7. An Example of Resource Allocation Generated by Existing Scheme [14]

	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4	...	TS10	TS11	TS12	...	TS20	TS21	TS22
CH. 1	8→7	8→5	5→7	7→4	4→1		8→7	8→5	5→7		8→7	8→5	5→7
CH. 2	6→1	3→4	3→2	5→1			6→2	3→4			6→3	3→4	3→2
CH. 3		6→2						6→1	6→3			6→2	
...													

Fig. 8. An Example of Resource Allocation Generated by Proposed Scheme

그래프 생성이 완료된 후, 네트워크 매니저는 각각의 그래프에 대한 자원 할당을 수행하되, 앞서 획득한 이동 장치의 이동 패턴에 따른 네트워크 위상 상태를 반영하여 자원 할당을 수행한다. Fig. 6, Fig. 7, 그리고 Fig. 8은 각각 Fig. 5에 대해 Han *et al.*에 따른 자원 할당 결과, Kim *et al.*에 따른 자원 할당 결과, 그리고 제안 방안이 적용된 Han *et al.*에 따른 자원 할당 결과이다. 각각의 할당표에서 세로축 CH는 사용 채널을, 가로축 TS는 시간을 의미하며, 각 칸에서 X→Y는 장치 X에서 장치 Y로 데이터를 전송한다는 의미이다. 예를 들어, Fig. 6의 TS0 / CH. 1 칸의 의미는 TS 0의 시간에 채널 1을 통하여 장치 8이 장치 7에게 데이터를 전달하기 위한 칸이라는 의미이다. 또한, 각 표에서 음영 표시된 부분은 이동 장치가 데이터를 전달하기 위해 할당된 부분을 나타낸다.

이에 기반하여 각 자원 할당표를 살펴보면, Fig. 6의 경우에 최초 이동 장치 6이 Join Process를 통해 장치 3과 장치 4를 통해 네트워크에 연결되었을 때의 자원 할당 결과를 나타낸다. 기존의 방법에서는 이동 장치의 이동을 고려하지 않고 현재 위치에 따라 Fig. 6과 같이 자원 할당을 수행한다. 표에서 볼 수 있듯이, 이동 장치의 이동과 관련 없이 그래프를 생성하는 시점에서의 자원 할당을 반복하고 있다. 따라서, TS10, TS20의 시점에서 이동 장치는 할당된 자원을 통해 데이터를 전달할 수 없다.

Fig. 7의 경우에, 이동 장치의 이동성 지원을 위한 원시적인 방법으로, 이동 장치가 존재할 가능성을 가진 모든 위치의

장치에 자원을 미리 할당해 둬으로써, 이동 장치가 언제 어느 위치에 있더라도 자기 주변의 장치를 통해 데이터를 전달할 수 있다. 하지만, 이동 장치의 실제 위치 여부와 별개로 고정 장치에 자원을 할당하기 때문에, Fig. 6이나 Fig. 8과 비교하였을 때, 이동 장치의 통신을 지원하기 위해서 상당히 많은 자원을 낭비하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 경우 제안 방안에 따라 이동 장치의 이동 패턴을 기반으로 자원을 할당하기 때문에, 앞서 3.1절에서 예측한 바와 같이 TS0일 때 이동 장치 6은 장치 1로, TS10일 때는 장치 2로, TS20일 때는 장치 3으로 자원 할당을 수행한다. 추가적으로, 예측 모델의 예측 오차로 인한 전송 실패를 방지하기 위하여, TS1일 때 이동 장치 6이 장치 2로, TS11과 TS12일 때 각각 장치 1로, 장치 3으로 자원 할당을 수행한다. 이러한 자원 할당 과정을 통하여 Fig. 6과 같이 자원을 할당한 경우 발생할 수 있는 이동 장치의 이동으로 인한 전송 실패 문제를 방지할 수 있으며, Fig. 7과 같이 이동성 지원을 위해 과도한 자원을 사용하는 비효율성 문제를 해결할 수 있다.

4. 성능 평가

본 장에서는 Kim *et al.*[14]와 Han *et al.*[17]의 방법에 따라 생성된 그래프 및 자원 할당이 수행된 네트워크와 제안 방안에 따라 생성된 그래프 및 자원 할당이 수행된 네트워크에서 이동 장치가 이동하는 경우에 전송 성공률 및 자원 점유

율에 대한 성능평가를 수행한다. 먼저 1절에서는 성능평가 환경에 관해 설명하고, 2절에서는 장치의 이동 속도에 따른 평균 전송 성공률에 대한 성능평가 및 분석 결과를, 3절에서는 이동 장치의 수에 따른 평균 전송 성공률에 대한 성능평가 및 분석 결과를 기술한다. 그리고 4절에서는 각 방안에서 사용하는 자원 점유율에 대한 성능평가 결과를 분석한다.

4.1 성능평가 환경 및 요소

기존의 연구와 제안 방안의 성능평가를 수행하기 위해 각각의 방안은 네트워크 시뮬레이터 NS-3 [18]을 통해 구현되었다. 500m x 500m의 네트워크에 100개의 장치를 격자 구조로 배치하였으며, 이 중 임의의 5개의 장치가 1.5m/s의 속도로 움직이는 시나리오를 가정하였다. 각 장치의 전송 범위는 50m이며, 모든 장치는 4초 간격으로 Gateway를 향해 데이터를 전달한다. 이동 장치의 이동으로 인한 네트워크 위상 변화가 초래하는 전송 성공률 저하 정도를 파악하기 위해 무선 전송 간의 전송 성공률은 100%로 가정한다. 각 성능평가는 6,400초 간 진행되며, 제공되는 결과 그래프는 각 평가를 10회 진행한 평균값이다. 성능평가를 수행하기 위한 항목과 용어는 다음과 같다.

장치의 수는 네트워크 내에서 동시에 움직이는 장치의 수로 정의된다.

이동 속도는 네트워크 내에서의 이동 장치가 얼마나 빠르게 이동하는지를 나타낸다.

전송 성공률은 장치로부터 발생한 데이터 수에 대비하여 게이트웨이까지 도달한 데이터의 수로 정의된다.

자원 점유율은 전체 가용 자원 대비 네트워크 구성을 위해 사용된 자원의 비율을 나타낸다.

4.2 이동 장치의 속도에 따른 전송 성공률

Fig. 9는 이동 장치의 이동 속도 대비 전체 장치의 전송 성공률의 성능평가 결과 그래프이다. 제안 방안을 제외한 나머지 방법들에 대해서, 이동 장치의 이동 속도가 증가함에 따라 전송 성공률이 하락하는 형태를 나타내고 있다. Han *et al.*의 경우, 앞서 2.2절 문제 정의에서 정의된 바와 같이, 이동 장치의 이동이 네트워크의 변화 및 경로 단절을 초래하고, 이에 대응하기 위한 Neighbor Discovery Process가 이동 장치의 이동으로 인한 네트워크 변화를 즉각적으로 반영하지 못하므로, 급격한 전송 성공률의 저하를 보인다. Kim *et al.*의 경우에, 이동 장치가 모든 위치에 존재한다고 가정하고 미리 모든 자원을 할당해 두었지만, 이동 장치의 이동 주기에 대해 고려하지 않고 있어서, 장치의 이동 과정에서 실제 할당된 자원을 이용하지 못하는 경우가 발생한다. 따라서 Han *et al.*에 비해 높은 전송 성공률을 보이지만, 전송 성공률이 일부 저하되는 모습을 보인다. 하지만, 제안 방안의 경우, 예측 모델에 따른 이동 패턴, 주기에 맞추어 자원을 선제적으로 할당함과 동시에, 약 14%의 예측 오차율을 고려하여 추가적인 자원 할당을 수행하기 때문에, 매우 높은 전송 성공률을 보인다.

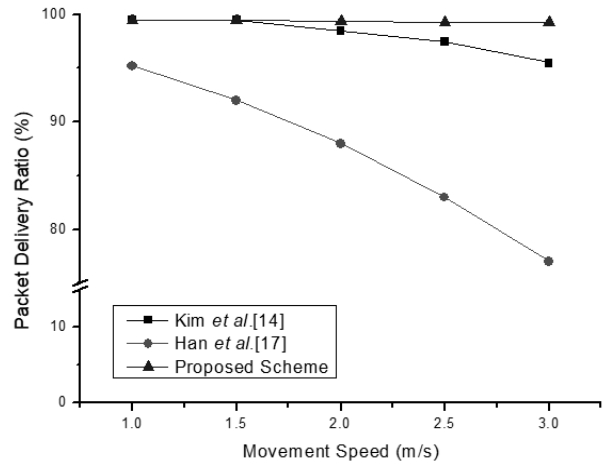


Fig. 9. Packet Delivery Ratio versus Movement Speed

4.3 이동 장치의 수에 따른 전송 성공률

Fig. 10은 이동 장치 수 대비 전체 장치의 전송 성공률에 대한 성능평가 결과 그래프이다. Fig. 10 역시 Fig. 9와 유사하게, Han *et al.*에 대해서, 이동 장치의 수가 늘어남에 따라 전송 성공률이 하락하는 형태를 나타내고 있다. 이는 이동 장치의 이동이 자신과 네트워크의 통신 단절을 야기할 뿐만 아니라, 자신을 거쳐서 게이트웨이로의 통신을 수행해야 하는 장치들의 연결성을 저해시키기 때문으로, 장치의 수가 증대됨에 따라 파손되는 경로들이 늘어나기 때문이다. 하지만 Kim *et al.*의 경우, 고정 장치와 이동 장치를 분리하여 그래프를 생성하기 때문에, 전송 성공률 측면에서 이동 장치의 수의 영향은 비교적 미미하다. 제안 방안의 경우, 앞서 Fig. 9에서와 마찬가지로 기계학습에 기반한 예측 모델을 통해 이동 장치의 이동 패턴, 주기에 따라 자원을 할당하였기 때문에, 이동 장치의 이동으로 인한 경로 단절 문제가 발생하지 않음과 동시에 높은 전송 성공률을 보인다.

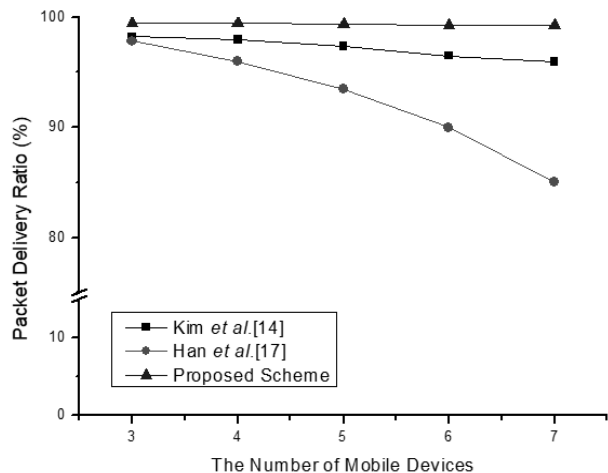


Fig. 10. Packet Delivery Ratio versus Number of Mobile Devices

4.4 자원 점유율

Fig. 11은 각 방법이 동작하는 과정에서 실제 사용된(점유된) 자원의 비율을 나타낸다. WirelessHART는 IEEE 802.15.4e를 기반으로 동작하는 네트워크로, 그 대역폭이 한정적이기 때문에, 자원의 효율적인 관리는 확장성 측면에서 큰 의미가 있다. Han *et al.*의 경우, 장치의 이동을 고려하지 않고, 단 하나의 위상을 기준으로 자원을 할당하기 때문에, 모든 방안 중에 가장 적은 자원 점유율을 가진다. 제안 방안의 경우, 이동 장치의 이동에 따라 변화하는 각 위상에 대해 별도로 그래프를 생성하고 그에 맞추어 자원을 할당하기 때문에, Han *et al.*에 비해 다소 높은 자원 점유율을 보여준다. 하지만, Kim *et al.*의 경우에는 이동 장치가 모든 고정 장치에 인접해있다고 가정하고, 그래프 생성 및 자원을 할당하기 때문에, 실제 이동 장치의 존재 유무와 관계없이 자원이 점유되어 있다. 따라서 Kim *et al.*이 가장 높은 자원 점유율을 보인다.

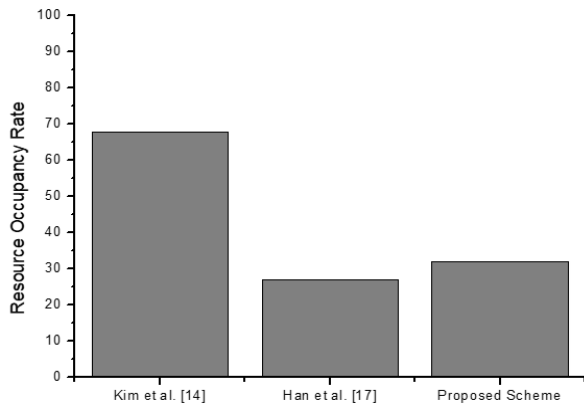


Fig. 11. Resource Occupancy Rate

5. 결론 및 향후 연구

과거 산업용 무선 센서 네트워크에서는 유선 네트워크의 단점을 완화하는 데 초점을 맞추어 연구가 진행되었기 때문에 잦은 네트워크 위상변화를 고려하지 않고 있다. 따라서, 네트워크 위상이 자주 변화하게 되는 경우, 그래프 재생성 및 자원 재할당으로 인한 관리 비용 증대 및 성능 저하와 같은 문제가 있다. 즉, 최근 다양한 이동 장치를 활용하는 산업용 무선 센서 네트워크에서 이동 장치로 인한 경로 단절 및 경로 재구성 과정에서 발생하는 전송 지연 및 신뢰성 저하를 방지하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 기계학습에 기반한 이동성 지원 방안을 제안한다. 제안 방안의 주요 아이디어는 선형회귀 알고리즘을 이용하여 이동 장치의 이동 패턴을 학습하고, 이에 기반한 이동 장치의 시간별 위치를 파악하는 것이다. 이를 통해 네트워크 매니저는 이동 장치가 언제 어떤 고정 장치를 통해 네트워크와 통신을 수행하는지 알 수 있으며, 각 고정 장치별 그래프 생성 및 자원 할당을 수행하여, 앞서 이동으로 인해 발생하는 문제를 방지한다. 성능평가 결과는 제안 방안이 추출한 이동 패턴과 실제 이동 패턴을 비교하였

을 때 약 86%의 예측 정확도를 보이고, 기존의 방법에 비해 적은 자원 점유율과 함께, 기존의 방법들에 비해 높은 전송 성공률을 보여준다.

다만, 본 연구는 오늘날 산업 환경에서 주력으로 사용되는 무인 운반차와 같은 이동 장치를 주요 고려 대상으로 상정하였기 때문에, 이동 장치의 이동 패턴과 주기가 비교적 뚜렷한 경우에 적합하다. 따라서, 주어진 임무에 따라 간헐적으로 움직이는 장치들이나, 정해진 경로가 아니라 경우에 따라 임의대로 움직이는 드론의 경우에 기계학습 예측률이 현저히 떨어지며, 제안 방안이 원활히 동작하지 않을 가능성이 있다. 이러한 시나리오는 산업용 무선 센서 네트워크가 좀 더 다양한 산업 환경에서 범용적으로 사용되기 위해 반드시 해결되어야 하며, 이를 위한 연구가 추가로 진행되어야 한다.

References

- [1] I. Iec, "62591: Industrial Communication Networks-wireless Communication Network and Communication Profiles-wirelesshart," IEC: Geneva, Switzerland, 2009.
- [2] X. Luo, J. Liu, D. Zhang, and X. Chang, "A Large-scale Web QoS Prediction Scheme for the Industrial Internet of Things Based on a Kernel Machine Learning Algorithm," *Computer Network*, Vol. 101, No.4, pp. 81-89, Jun. 2016.
- [3] Copyright Deutsche Bank Research, "Industry 4.0: Huge Potential for Value Creation Waiting to be Tapped," Available: <https://www.i40.de/wp/wp-content/uploads/2015/04/Industry-4.0-Huge-potential-for-value-creation-waiting-to-be-tapped.pdf>, Accessed on 2014.
- [4] G. P. Sullivan, R. Pugh, A. P. Melendez, and W. D. Hunt, "Operations & Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency, Release 3.0," Pacific Northwest National Laboratory, U.S. Department of Energy, Aug. 2010.
- [5] H. Hashemian, "Wireless Sensors for Predictive Maintenance of Rotating Equipment in Research Reactors," *Annals of Nuclear Energy*, Vol.38, Iss.2-3, pp.665-680, 2011.
- [6] K. S. Low, W. N. N. Win, and M. J. Er, "Wireless Sensor Networks for Industrial Environments," *International Conference on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce (CIMCA-IAWTIC'06)*, Vol.2, pp.271-276, Nov. 2005.
- [7] S. Oh and K. Jung., "Multipath Routing for Reliable Real-time Data Dissemination in Industrial Wireless Sensor Network," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.43, No.10, pp.1608-1618, Oct. 2018.
- [8] Hart Specification [Online]. Available: <https://fieldcommgroup.org/hart-specifications/>

[9] I. Iec, "62601: Industrial Communication Network - Fieldbus Specifications - Wia-pa Communication Network and Communication Profile," IEC: Geneva, Switzerland, 2008.

[10] K. N. Qureshi and A. H. Abdullah, "Adaptation of Wireless Sensor Network in Industries and their Architecture, Standards and Applications," *World Applied Sciences Journal*, Vol.30, No.10, pp.1218-1223, 2014.

[11] I. Iec, "62591: Industrial Communication Networks-wireless Communication Network and Communication Profiles-wirelesshart," IEC: Geneva, Switzerland, 2009.

[12] S. Montero, J. Gozalvez, M. Sepulcre, and G. Prieto, "Impact of Mobility on the Management and Performance of Wireless Industrial Communications," *Proceedings of IEEE International Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA'12)*, pp.1-4, Sep. 2012.

[13] L. Zheng, "Industrial Wireless Sensor Networks and Standardizations: The Trend of Wireless Sensor Networks for Process Automation," *Proceedings of SICE Annual Conference*, pp.1187-1190, 2010.

[14] S. Kim, K. Jung, H. Cho, C. Kim, T. Yang, and S. Kim, "Routing Graph Construction Scheme to Prevent Path Failure due to Mobile Devices in Industrial Wireless Sensor Networks," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.44, No.3, pp.528-539, Mar. 2019.

[15] D. P. Kumar and T. Amgoth, "Machine Learning Algorithms for Wireless Sensor Networks: A Survey," *Information Fusion*, Vol.49, pp.1-25, Sep. 2018.

[16] W. Zhao, S. Su, and F. Shao, "Improved DV-hop Algorithm using Locally Weighted Linear Regression in Anisotropic Wireless Sensor Networks," *Wireless Personal Communication*, Vol.98, No.4, pp.3335-3353, Feb. 2018.

[17] S. Han, X. Zhu, A. K. Mok, D. Chen, and M. Nixon, "Reliable and Real-time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks," *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pp.3-12, Apr. 2011.

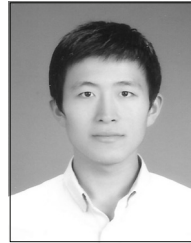
[18] NS-3, "Network Simulator-3.26," <http://www.nsnam.org/>, accessed Jan. 22. 2012.



김 상 대

<https://orcid.org/0000-0002-3073-3876>
 e-mail : sdkim.cse@gmail.com
 2013년 충남대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2019년 충남대학교 컴퓨터공학과(박사)
 2019년 경상대학교 선임연구원
 2019년 충남대학교 박사후연구원

2020년 ~ 현 재 공주대학교 산학협력단 박사후연구원
 관심분야: 무선 센서망, 산업용 무선센서망, 사물인터넷 등



김 천 용

<https://orcid.org/0000-0003-2276-8013>
 e-mail : cykim0807@gmail.com
 2013년 충남대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2015년 충남대학교 컴퓨터공학과(석사)
 2019년 충남대학교 컴퓨터공학과(박사)
 2019년 ~ 현 재 한국과학기술정보연구원
 박사후연구원

관심분야: 사물인터넷, 저전력광역대역통신망, 무선 센서망 등



조 현 중

<https://orcid.org/0000-0002-5817-4623>
 e-mail : hilposhon123@gmail.com
 2013년 전북대학교 전자, 정보공학부
 컴퓨터공학과(학사)
 2020년 충남대학교 컴퓨터공학과(박사)
 2020년 ~ 현 재 충북대학교
 정보통신공학부 박사후연구원

관심분야: 무선 센서망, 산업용 무선센서망, 사물인터넷 등



정 관 수

<https://orcid.org/0000-0002-6777-9923>
 e-mail : ksjung@dju.ac.kr
 2005년 충남대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2007년 충남대학교 컴퓨터공학과(석사)
 2015년 충남대학교 컴퓨터공학과(박사)
 2016년 호원대학교 사이버보안학과 조교수

2020년 ~ 현 재 대전대학교 핀테크학과 조교수
 관심분야: 사물인터넷, 옛지컴퓨팅, 핀테크보안 등



오 승 민

<https://orcid.org/0000-0002-2139-8746>
 e-mail : smoh@kongju.ac.kr
 2009년 충남대학교 컴퓨터공학과(학사)
 2015년 충남대학교 컴퓨터공학과(박사)
 2016년 UCLA 박사후연구원
 2019년 충북대학교 박사후연구원

2019년 ~ 현 재 공주대학교 컴퓨터공학부 조교수
 관심분야: 무선 센서망, 사물인터넷 등